

ダムコンクリート打設工程計画支援のためのスケジューリング・システム

A Scheduling system to support Dams Concrete placement-planning

**

石 川 晃

By Akira ISHIKAWA

AI (artificial intelligence) technology is actively studied the creation of expert systems and others. Recently, AI technologies tend to fuse with advanced software (neural network, fuzzy, etc.) and to form a more accurate technical ground for new AI-related technologies. In the construction industry, complication of execution conditions and lack of skilled workers have increased the weight of progress control and planning. Utilization of an expert system was considered as a measure to overcome these circumstances. This system has been developed based on the recognition of the present situation and on the basis of knowledge of skilled engineers and the existing system, and created knowledge base system by AI technologies.

1. はじめに

コンピュータの利用技術は急速に進歩、普及をつけ中でもAI (人工知能) 技術は、各産業でエキスパート・システムを中心に研究・開発が進んでいる。建設分野においてもAI技術を利用した評価、診断工法選定等、種々のエキスパート・システムが開発されている。施工現場においても効率的なダム建設の施工方法を確立するためにダム用機械の性能の向上やRCD工法の採用などの施工技術の向上等、多くの努力が払われてきている。コンクリートダムの施工計画の中心をなすリフトスケジュールの作成は工事施工方法、仮設備能力、地形、気象条件等工事によって異なる諸制約条件が相互に関連し合っているので経験を積んだ技術者の担当業務である。また

人手によって計画を作成する場合には、各種の条件を加味したシミュレーションを必要とする複雑な作業である。筆者らがAIを利用したスケジューリング・システムの開発に取り組んだ動機は、第一に上記のことであるがこれ以外に、①リフトスケジュールの手法が比較的明確な方法論である。②リフトスケジュール自体が机上の論理である。③打設工程の知識ベース化が容易である。④推論過程がユーザに説明しやすい。⑤既にコンピュータ化されている技術なので知識を構築しやすい。等AI化に適した条件を備えている点にある。工事施工の近代化や合理化をめざして効果的な施工計画を支援するために本システムでは、複雑な推論機能を開発するよりも現場のニーズに合った柔軟で使い易いシステムをめざし、現場の施工管理作業を支援するシステムとして位置付けている。また、本システムの適用範囲は、基本的に提体のスケジューリングと考え越流ブロッ

*キーワード: ES, AI、ダム、リフトスケジュール

**正会員: 三井建設(株) 技術研究所

(〒270-01 千葉県流山市駒木518-1)

クの処理は含んでいない。グラウト作業や構造物の構築作業等の関連作業は、待日数に換算してスケジューリングを行うことにした。

2. システムの概要

コンクリートダムの施工は、大量のコンクリートを使って建設されるが一日に打設される量には限りがある。そのために設計されたダムをある範囲に区切ってコンクリートを打設する。このためにコンクリートダムの打設順序の最適案を求めるには多くの時間が必要とされる。本システムでは、コンクリートダム（マスコンクリート構造物にも適用できる）の打設順序および最適打設日を求めるシミュレーションを行うことによって、①在来工法やRCD工法にも利用でき、計画段階及び施工途中から工期終了までの計画のいずれにも適用が可能である。②条件変更による繰り返し作業にも対応できるので精度の高い最適化が計れる。③推論結果としてダム構成図上に打設日表示を行い、スケジューリングを可視化する。④コンクリート打設進捗図、打設数量表、工程図等の各種の表示機能による確認処理を行うことができる。等の特徴を持っている。尚、スケジューリングされた推論結果をもとに、モデリングされたダム形状とでCG化し、3次元モデルの景観として打設状況をリアルに実現するためのビジュアル・シミュレーション・システムへの接続できるシステムとなっている。

3. システムの特徴

本システムでは、4種類のシミュレーション手法を選択可能としており、特に従来システムでは対応されていない後ろ向きスケジューリングを行うことができる。

①打設開始日指定による方法

打設開始したい年月日を指定し、ダム形状をもとに最も早く打設を完了する打設順を作成する。

②打設終了日指定による方法

特定ユニットの打設日を指定し、指定日に打設できる様に開始日を逆算して打設順を作成する。

③形状指定による方法

ダム構成図上に希望する形状をマウスによって画面表示し、その形状をいつまでに終了させるかの

打設終了日を指定する。これにより指定された形状に、最も近い形状になるような打設順を作成する。特に年度末等の期間終了形状の確認をすることができる。

④ボリューム（数量）指定による方法

打設総数量を指定することにより、その打設量までの打設順を作成する。特に年度数量による形状確認ができる。

4. システム構成と機能

4. 1 システム構成

本システムは、リストスケジュール作成に基本的に必要な項目を処理する機能である基本処理、リフトスケジュールを考案するスケジューリング作成処理、作成したリフトスケジュールの状況や結果を表示する出力処理から構成される。本システムを構成する稼動環境（図-1）は、UNIXを利用したシステムである。エキスパート・システム構築には、構築が容易なエキスパートシェルとしてKEEを、プログラム言語としてLispを用いて作成した。スケジューリング・システム概念図を図-2に示す。また、本システムの作業手順は、入力作業、スケジューリング指示、および確認作業とも画面上の操作パネルより対話形式で行える。スケジューリングの手順を図-3に示す。

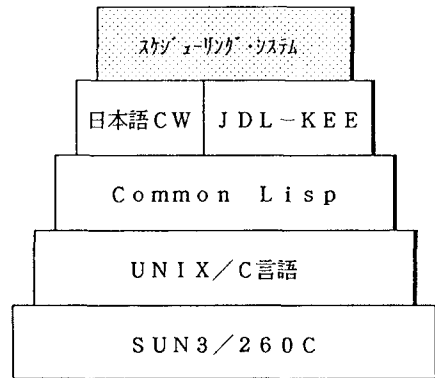


図-1 稼動環境

4. 2 基本処理

(1) 形状データの作成

形状入力、ダム構成図（図-4）中に示すよう

うな基礎岩盤の標高、ダム天端標高、ブロック毎のダム平面寸法や断面寸法等の基本的な位置を入力して形状を作成し、そのデータをもとに自動ボリューム計算をする。上下流方向からのデータは、各ジョイント毎の標高をプロットして行い各ブロックの岩着は両側のジョイントの標高のうち低い値とする。この方法で表現できないブロックは直接標高の設定をする。この他自動ボリューム計算をしないで、ダム軸方向と上下流方向のブロック数、リフト数を指定してダム構成図を作成する方法も利用できる。また、ダムの規模が大きくて全体構成図が入りきれない場合は、ズーム機能を使用して小さく表示することもできる。

(2) 条件設定

条件入力、条件設定パネル(図-10)に示すように入力しやすいユーザ・インターフェスを利用して、基本条件の設定(打設形状、打設能力、輸送能力、サイクルタイム、標準打設時間等)、計画条件の設定(打設方法、開始日指定、基本型枠高、待日数条件等)さらに、在来工法条件の設定(リフト差、長期放置期間、自動ハーフ変換モード等)等を選択し、実際のかつ現実的な入力情報を与えることにより、コンクリート打設の作業工程をモデル化してシュミレーションを実現している。打設形状は、①歯形打設、②V型打設、③RCD打設の3通り選べ、①あるいは、②から変形した自由な打設形状を設定することができる。

4.3 スケジューリング作成処理

スケジューリングは、KEEの持つ多重世界機能「KEE worlds」の一部を利用した。このKEE worldsは、複数の仮設世界で推論を可能にする機能であるが、ここでは実行パターン(推論順序)を記憶させ実行時にこのパターンを参照して推論に役立てる形を取っている。特に形状指定による方法では、KEE worldsの情報から指定された形状に最も近くなるようにパターンを参照して後向き推論を実行する。

(1) 在来工法

推論は、ブロック固有の情報から打設可能状態にあるリフトを求め(第1候補)、次にリフト同士の関連からいくつかの候補を削除し(第2候補)、さ

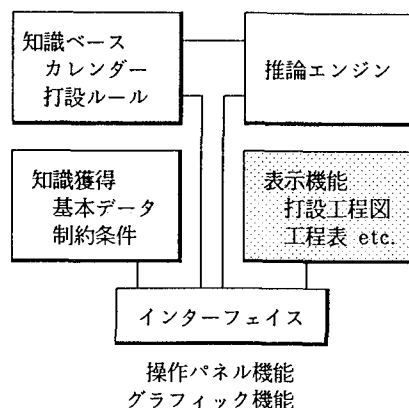


図-2 スケジューリング・システム概念図

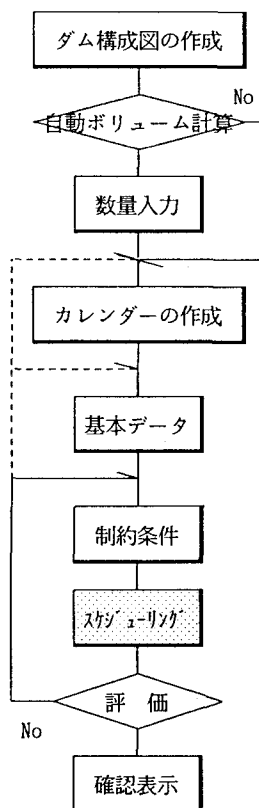


図-3 スケジューリング・システムの手順

らに1日の許容打設量に従って打設リフトが決定される(第3候補)。翌日の第1候補は、第2候補で削除されたリフト郡が再利用され目標状態に到達するまで繰り返しシミュレーションを行う。

(2) RCD工法

RCD工法の打設は一層における分割位置(施工線)や適切な分割数を決めることを重点に考えてシミュレーションを行うことにした。

新しい打設層になったか、新打設層なら施工線の分割を考え、全ての打設箇所の総ボリュームと打設能力から、適切な分割数案を作成する。下層で打設した分割数と新分割数を比較して同じなら、下層データの分割位置をもとに施工分割案を作成する。上記条件に適合しなかったり、新しい施工分割案ができなかったら再度全ての分割案の候補を評価し、上記の中から最もよいと思われる分割案を選択する。もし、適切当な施工分割案が発見できなかったら、最も均等に分割してある施工分割案を選び出す。

4. 4 出力処理

(1) 打設形状

スケジューリング開始と同時に打設形状を可視化する。特にブロック、リストを月毎(年毎にも指定可)に色分けをして表示し、コンクリートの仕上がり形状の確認が可能となる。特にRCD工法では、打設形状上に施工線位置の表示を行うことが出来る。図-5に在来工法による暦日打設工程図、図-6にRCD工法による暦日打設工程図を示す。

(2) 打設量の集計

スケジューリング結果をもとに日々のコンクリート打設量および打設時間を集計し、月当たりの最大打設量、平均打設時間を算出し、月別コンクリート打設進捗図(図-7)、コンクリート打設H-V曲線図(図-8)、月別打設数量総括表等各種集計表の出力をする。また、スケジューリング終了時に、いくつかの指標値として打設日数率、コンクリート打設率、総打設箇所総コンクリート数量等の定量的な出力情報を表示する。

(3) 工程表の作成

公休日、定期整備日、気温降雨による制約を打設打設カレンダー(図-11)より参照して、暦日打

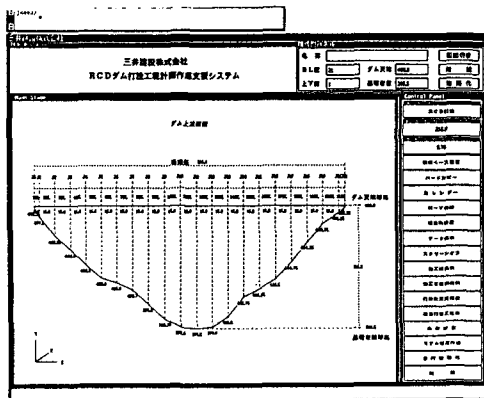


図-4 ダム構成図

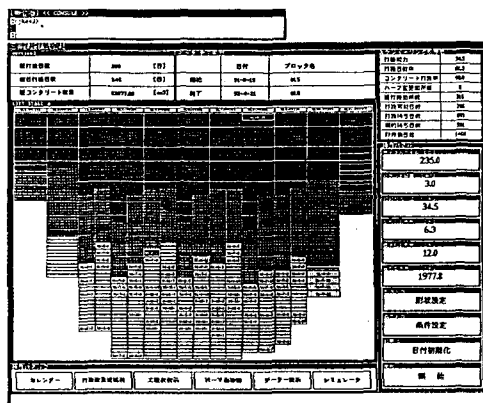


図-5 暦日打設工程図(在来工法)

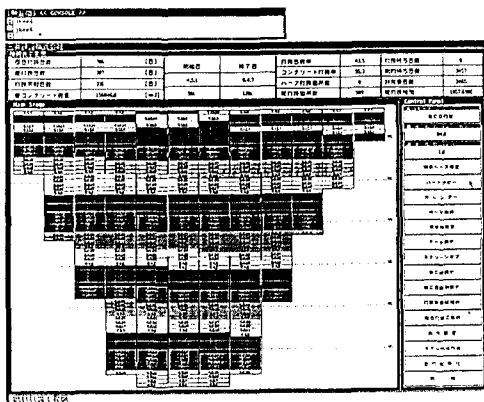
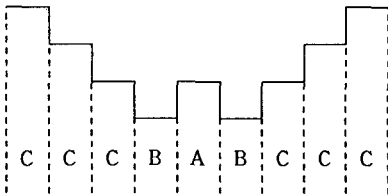


図-6 暦日打設工程図(RCD工法)

設工程表（図－１０）を作成する。

５． ルールシステムとルール化手法

スケジューリングは、経験則を表現したIF～THEN～形式のルールによる前向き推論によって実行される。推論は、３段階に分かれてそれぞれの段階で使用するルールは、ルールクラスとしてまとめてあり推論の効率化を計っている。また、ルールもフレーム化されているため条件を変更して実行したい場合でもルールを変更する必要はなく、フレーム中の値を変更するだけでよい。在来工法での打設ルールは両隣ブロックより高い（A_先行ルール）、両隣ブロックより低い（B_後続ルール）、右岸または左岸ブロックが中央より高い（C_左右ルール）があり、これらを組み合わせてルールベース化を図った。図－１２にルールの組み合わせを示す。

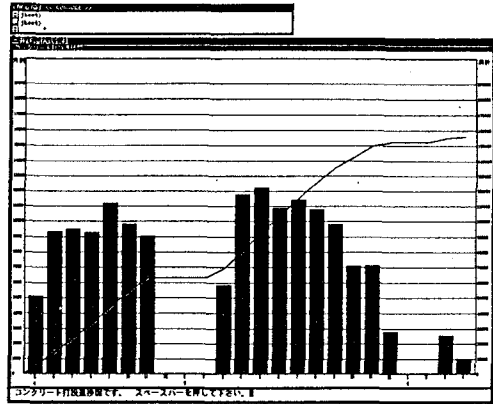


図－１２ ルールの組み合わせ

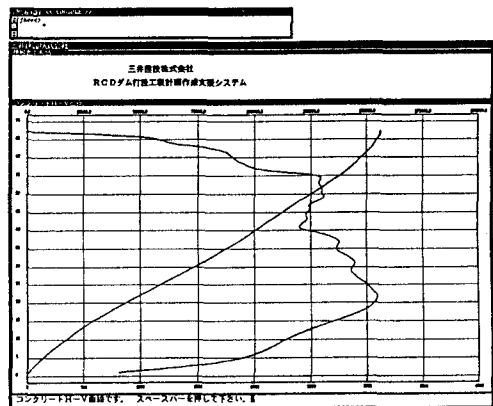
また、打設を決定するための打設優先リフトの決定ルールを設け、①３０日以上放置リフト、②２５日以上経過リフト、③上層ハーフ、④着岩リフト、⑤最優先ブロックデータ、⑥ブロック優先順位、⑦上下流優先順位、⑧最多ボリューム組み合わせの探索、等の順に優先順位をつけて打設の最適化を行う。ＲＣＤ工法でのルール化では、ＲＣＤ工法は一種のレアー工法であり横一列に順番に打設して行くのでそのため打設する方向を決めるルールのみだが、在来工法との混在では、上記ルールも適用される。

６． オブジェクト指向技術の利用

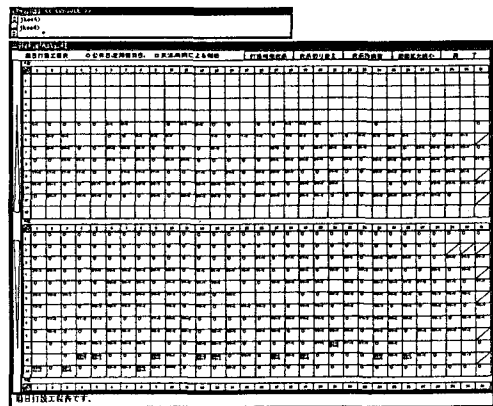
本システムでは、ダム形状を表現する方法としてオブジェクト指向技術を用いて構築した。コンピュータ上に、人間が見ている現実世界の構造を再現することが可能な方法であり、一種のモデル化手法である。このオブジェクト指向技術を利用し、①共通項



図－７ 月別コンクリート打設進捗図



図－８ コンクリート打設H－V曲線図



図－９ 暦日打設工程表

のあるグループを一つにまとめてクラス形成して知識の階層化構造を実現する。②上位クラスで定義されたオブジェクトデータは、下位クラスに継承されるので重複した定義が不用である。③現実世界の構造をそのままコンピュータ上に構築できるので、プログラムを人間の思考法のままシミュレートできる。④オブジェクト中に定義されているメソッドにより、各オブジェクト間での手続的な処理が可能となる。等の特徴を用いることにより、複雑なダム形状を表現する場合でも容易にできリフトの追加や削除もプログラムの変更せずに可能となる。

7. 自動ボリューム計算

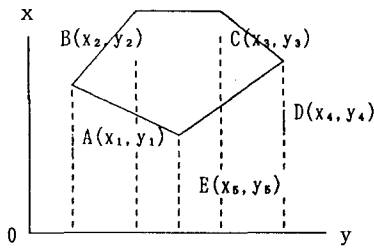


図-1 3 直角座標による方法

ボリューム計算は、掘削土量を求めるときに広く用いられる方法の1つである両端断面面積平均法を利用した。その手順として、①求めるリフトの上下層面の面積をそれぞれ求め、②さらに、その面積の平均を求めて、④敷均す高から体積を求める。上下層の面積は、座標法の直角座標による方法を用いて算出した。図-1 3において、各点の座標値よりY軸に垂線をおろした交点をa、b、c、d、eとし、それぞれの交点による台形を形成する面積より求められるので、ABCDEの面積Sは、次によって求める。

$$\begin{aligned}
 S &= 1/2 \{ (x_1+x_2)(y_2-y_1) + (x_2+x_3)(y_3-y_2) \\
 &\quad + (x_3+x_4)(y_4-y_3) \} \\
 &\quad - \{ (x_5+x_1)(y_5-y_1) + (x_4+x_5)(y_4-y_5) \} \\
 &= 1/2 \{ y_1(x_5-x_2) + y_2(x_1-x_3) + y_3(x_2-x_4) \\
 &\quad + y_4(x_3-x_5) + y_5(x_4-x_1) \}
 \end{aligned}$$

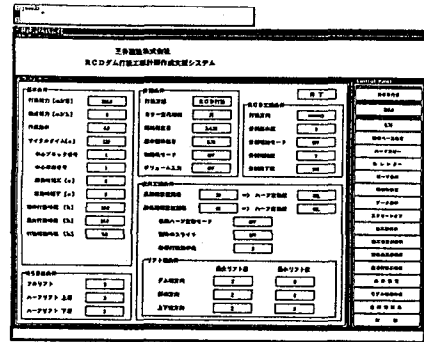


図-1 0 条件設定パネル

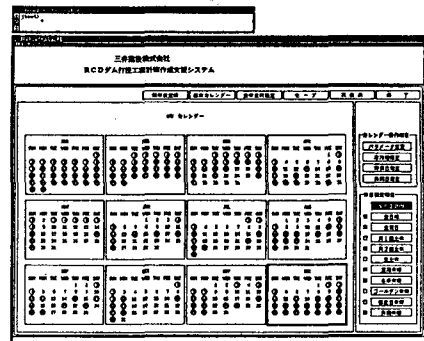


図-1 1 打設カレンダー

8. まとめ

本システムの利用により、打設形状の状態やRCD工法における施工線位置の予測が可能となりコンクリートダムにおける打設計画の最適化と合理化が図れるものと予測される。特に在来工法とRCD工法との混存にも対応できるために幅広い計画が可能となる。今後多くの施工が期待されるRCD工法のダムにも適用し、より多くの知識の蓄積を行いシステム機能の向上より現実的なシステムへの改良を加えていくことが必要と思われる。

<参考文献>

- 1) 石川・長谷・高田：A I によるダム打設工程計画システム、第4回土木学会年次学術講演集(VI)、pp. 50~51、1989
- 2) 春日屋伸昌：測量学Ⅱ、朝倉書店、pp. 280、1981